第14回 電磁シールドのしくみ

小暮裕明

ボードの記事　ビギナーズ

高周波回路が動作すれば，その周りの空間には電界と磁界が発生します．回路から離れた場所では空間を移動する電磁界も観測されます．これがマクスウェルの方程式によってその存在を予測された「電磁波」です．ヘルツは実測によりその存在を証明し，マルコーニは無線電信の実験に成功して実用化しました．一方で，回路から放射される不要な電磁波は，EMI（電磁妨害）問題の源になりますから，その影響を排除する技術も必要になります．今回は電磁波の侵入を阻止し，また逆に電磁波ノイズを漏らさない，電磁シールドについて学びます．（筆者）

1. 電界シールドの方法

● 静電シールド

シールド（shield）は「遮へい」と訳し，覆いをすることを意味します．また遮断とも言いますから，電磁シールドといえば，電磁界をさえぎって通過させないことを意味します．

図1は，空間に孤立した導体がN個（ここでは4個）あって，それぞれQ_nの電荷を持っているときの電気力線を示しています．時間変動のない静電界では，このように電界を流線で描いた電気力線を用いて理解することができます．

今，一つの孤立した導体に電荷Qを与えると，その導体に電位Vが生じ，その比をその導体の静電容量と言います．

$$C = \frac{Q}{V} \quad \cdots\cdots(1)$$

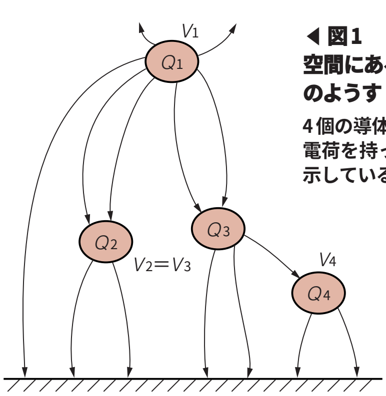
また二つの孤立した導体1と導体2に，$+Q$と$-Q$の電荷を与え，それぞれの導体の電位がV_1とV_2である場合，2導体間の静電容量は次の式で表されます．

$$C = \frac{Q}{(V_1 - V_2)} \quad \cdots\cdots(2)$$

電位差 $V_1 - V_2$ をVとすれば，式(2)は式(1)になる

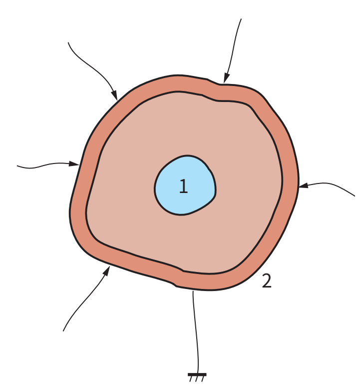
図1で，Q_2による電位V_2と，Q_3による電位V_3が等しければ，両導体間に電気力線はなく，電界による結合は生じません．一方，Q_1による電位V_1と，Q_3による電位V_3のように，電位の異なる導体間には電気力線が結ばれ，電界による静電結合が生じます(1)．

図2は，導体2で導体1を完全におおい，導体2をグラウンドにつないでゼロ電位にしています．導体2の電位は一



◀ **図1 空間にある導体の電荷と電気力線のようす**

4個の導体があって，それぞれQ_nの電荷を持っているときの電気力線を示している．



▶ **図2 静電シールド**

導体2で導体1を完全におおい，導体2をグラウンドにつないでゼロ電位にしている．導体2の外側にある電界の影響は，導体1にはまったく及ばなくなる．



写真1　ファラデーの作った実験器具
ロンドンの王立協会のファラデー博物館内に展示されている（筆者撮影）．



写真2　ファラデーの立像
ロンドンの王立協会（筆者撮影）．

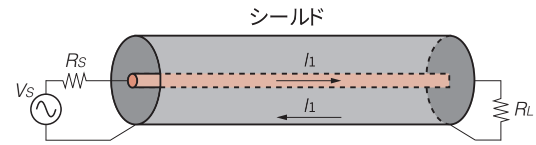


図3　同軸ケーブルの構造
内導体線路の周りを円筒状の金属（シールド）が囲っている．

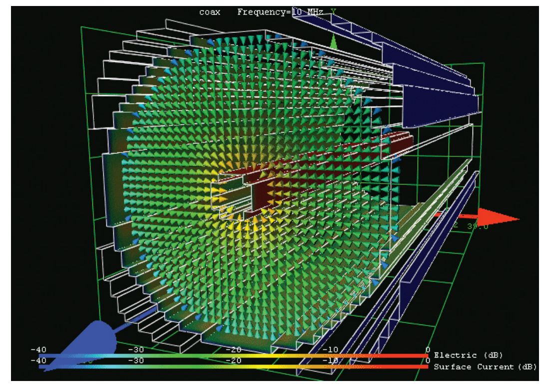


図4　同軸ケーブル断面の電界ベクトルのようす（10MHz）
電磁界シミュレータ Micro-Stripes による同軸ケーブルのシミュレーション結果．

定であればよく，接地しなくてもよいのですが，実用的にはゼロ電位で一定にするのが楽です．

このようなときには，導体2の外側にある電界の影響は，導体1にはまったく及ばなくなり，この状態を静電シールド（または静電遮へい）と呼びます．

こんどは導体1の電位をV_1，導体2をゼロ電位とすると，導体1から出る電気力線はすべて導体2で終わり，導体2の近くに導体3があっても電荷は現れません．

● ファラデー・ケージ

図2のように，静電界を遮へいするような金属または金属メッシュなどでできた容器を，ファラデー・ケージ（Faraday cage）といいます．**写真1**は，ロンドンにある王立協会（ファラデー博物館内）に展示されているそれらしき装置です．ファラデー[注1]（**写真2**）は手先が器用だったらしく，さまざまな実験器具を自作しています．

この装置は，真ちゅうのような導体でできた球体の容器の中に帯電させるための導体球がある構造で，これらの間は絶縁するようになっています．**写真1**の左には，大理石をくり抜いた絶縁材が見えます（ファラデーが行った実験の手順は，本誌2004年10月号，pp.142-149の連載第6回を参照）．

内導体から電線を引き出して電位計に接続し，外導体の容器を接地してV（V）を表示したとき，内外容器の間の静電容量をC（F），容器内の電荷をQ（C）とすると，式(1)から，次の関係が成り立ちます．

$$Q = CV \qquad \cdots\cdots(3)$$

これにより電位計の値を電荷量に変換して測定することができますが，同じ原理で「ファラデー・ケージ法による静電電荷量測定器」として製品化されています[注2]．また，この測定具そのものをファラデー・ケージと呼ぶこともあります．

ファラデー・ケージの内部容器から引き出す電線は，静電誘導[注3]によるノイズを防ぐために，金属はくや金属製の組みひもなどで内部の導線を覆ったシールド・ケーブルを使用しています．

注1：ファラデー（1791年～1867年）は，イギリスの物理学者，化学者．ロンドン郊外の鍛冶（かじ）屋の子として生まれ，科学に興味を持ち，試作・実験を繰り返した．王立研究所で助手，教授として清貧の生活を続ける．電磁誘導の発見（1831年），電気分解のファラデーの法則（1833年），自己誘導の発見（1834年）など，また静電気の研究では電場，磁場，力線などを用いた近接作用論を提唱（1835年）．静電容量（キャパシタンス）の単位F（ファラッド）は，彼の名にちなんでいる．
注2：ファラデー・ケージ型電荷量測定器（KQ-1400）：http://www.ekasuga.co.jp/ やhttp://www.webshiro.com/syouhinsetumei/wpkaq1400.htm を参照．
注3：静電誘導とは，導体や誘電体の近くに帯電体がある場合，帯電体に近い部分に異符号，遠い部分に同符号の電荷が誘起される現象．

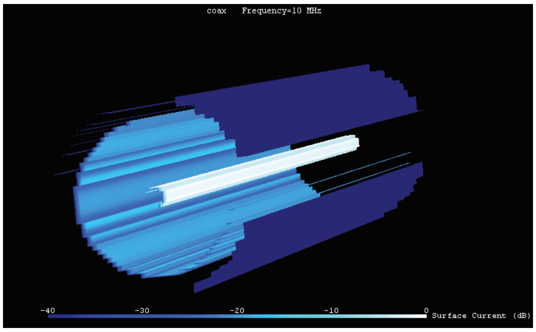


図5　同軸ケーブルの表面電流（10MHz）
外導体の外面には電流が流れていない．

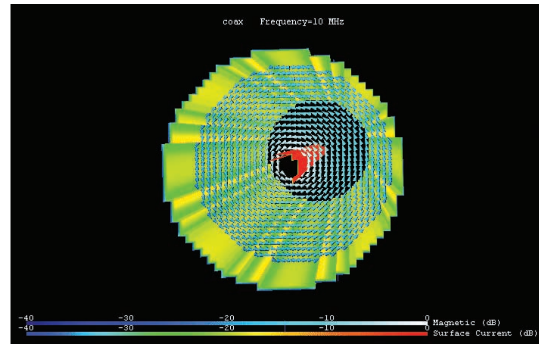


図6　同軸ケーブル内の磁界（10MHz）
同軸ケーブル内の磁界は，導体の周りにループ状に分布する．

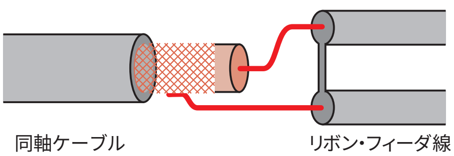


図7　同軸ケーブルの先にリボン・フィーダ線を接続

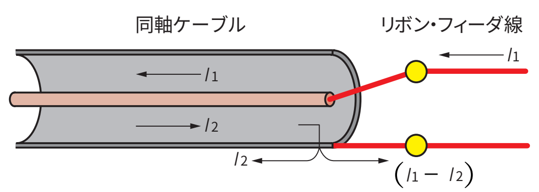


図8　同軸ケーブルに直接平衡線路を接続
同軸ケーブルの外導体の内面を流れてきた電流の一部(I_2)は外導体の外側に回り込む．

● 高周波電界のシールド効果

同軸ケーブルは図3のような構造で，内導体線路の周りを円筒状の金属（シールド）が囲っています．図4は電磁界シミュレータMicro-Stripes注4による同軸ケーブルのシミュレーション結果です．断面の電界ベクトルのようすを示しています．これは10MHzの信号を加えたときのある瞬間の表示ですが，外導体の壁面から垂直に出て内導体の面に垂直に入る電界の分布が見られます．

このように導体間の電界によって容量が存在するので，電荷量測定器で計算するCには，シールド線の容量も加える必要があることがわかります．

さて，同軸ケーブルの外導体はグラウンドなので，ファラデー・ケージの外部容器を接地してゼロ電位にしたと考えられます．しかし，周波数が高くなるにつれて，シールド表面の電荷の移動によってシールド上の電流が増します．そして，表面抵抗によって電圧降下を生じるので，電界シールド効果が低下します．さらに周波数が高くなると表皮効果（本誌2005年6月号，pp.133-140の連載第12回を参照）が現れ，シールド効果は変動します[(1)]．

同軸ケーブルの電界は外導体と内導体の間に発生し，外導体の内面には，内導体に流れる電流と逆向きの電流が流れています（図3のI_1）．またシミュレーション結果でも明らかなように，外導体の外面には電流が流れていません（図5）．

磁界は，図6のように，内導体の周りにループ状に分布し，内導体表面と外導体の内側表面に電流が流れます．高周波では表皮効果によって，外導体の内側表面に電流が集中し，外側の表面には流れなくなります．

● 同軸ケーブルの接続

シールド・ケーブルを使えば外部からのノイズの干渉を排除し，またケーブルから外部へノイズの放射をなくす効果が得られるわけですが，同軸ケーブルでは次のような点に注意する必要があります．

同軸ケーブルの先に，図7のようにリボン・フィーダ線を接続したとします．リボン・フィーダ線のような線路は平衡線路なので，2線を流れる電流の大きさは同じで，逆向きである必要があります．しかし，不平衡線路である同軸ケーブルに直接平衡線路を接続すると，同軸ケーブルの外導体の内面を流れてきた電流の一部(I_2)は外導体の外側に回り込みます（図8）．これによってフィーダ線の片側に流れる電流は$I_1 - I_2$になり，2線には大きさの異なる電流

注4：Micro-Stripes（マイクロストライプス）のホームページのURLは，http://www.microstripes.com/.

が流れてしまいます．

これによってフィーダの2線を同一方向へ流れる不平衡電流成分が現れ，同軸ケーブルの外導体に流れる電流と一体となり，いわゆるコモンモード電流を形成することになります．これらにより，両ケーブルからは不要な電磁波の放射[2]が起こり，シールド・ケーブル本来の効果は損なわれることになります．

EMIの観点から，不平衡線路と平衡線路の直結は避けるべきですが，コモンモード電流の発生を防ぐ手段として，**図9**のような阻止管（シュペルトップ）があります．アマチュア無線の自作では，よく同軸ケーブルの外導体の網線長を1/4波長にして覆いますが，これは波長短縮率を考慮した長さ（例えば約67%）です．

1/4波長伝送線路の入力インピーダンスZ_{IN}では，次のようなおもしろい関係が成り立ちます．

$$Z_{IN} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \quad \cdots\cdots (4)$$

Z_0：線路の特性インピーダンス，Z_L：負荷

式(4)によれば，入力インピーダンスは負荷のアドミタンスに比例する関係があるので，変成器として利用されます[3]．**図9**において先端を短絡（$Z_L = 0$）した場合，入力インピーダンスは無限大になります．したがって，**図9**の接続点では，阻止管と電気的に絶縁したのと同じ状態になり，リボン・フィーダ線には平衡電流が流れるようになります．

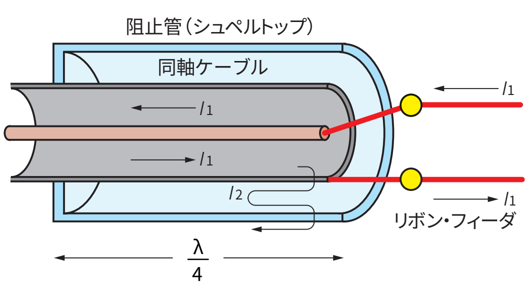


図9　阻止管（シュペルトップ）
接続点では，阻止管と電気的に絶縁したのと同じ状態になり，リボン・フィーダ線には平衡電流が流れるようになる．

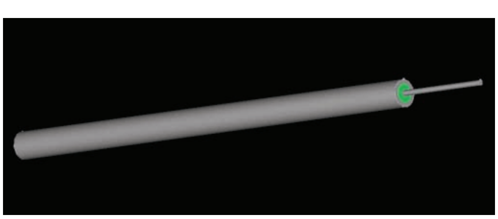


図10　同軸ケーブルの内導体をむき出しにした状態
露出線路の長さは50mm．同軸ケーブルの端にポート（waveguide port）を設定．

● 同軸ケーブルからの放射問題

ダイポール・アンテナ（本誌2005年1月号，pp.128-135の連載第8回，2005年3月号，pp.88-96の第9回，2005年4月号，pp.136-144の第10回を参照）は平衡回路ですから，同軸ケーブルを直付けすると，同軸ケーブルの外導体からも電波の放射が起こり，放射パターンに悪影響を及ぼします．また受信時には，本来のアンテナ素子ではなく，同軸ケーブルそのものが周辺のノイズを拾うことにもなります．

このように，不平衡電流を阻止して，平衡電流だけを流すための回路をバラン（balun：balanced to unbalanced transducer）と呼んでいます．

図10は同軸ケーブルの内導体をむき出しにした状態です．先端が開放ですから，信号は全反射して戻ってくるはずです．**図11**は，Micro-StripesでシミュレーションしたS_{11}の結果です．いくつかの周波数で反射が少なくなっていることがわかります．このとき同軸ケーブルに供給された電磁エネルギーの多くは空間に放射され，結果としてS_{11}（反射係数）の値が小さくなっていると考えられます．

例えば，周波数が1.4GHzのときの同軸ケーブルの表面電流を調べると，**図5**では観測されなかった外導体の外側の表面に，周期的に強い電流が認められます（**図12**）．また電磁界シミュレータでは，遠方界放射パターンを調べることで放射の強弱方向を特定できますが，**図13**の表示から同軸ケーブルの外導体からの放射も認められます．

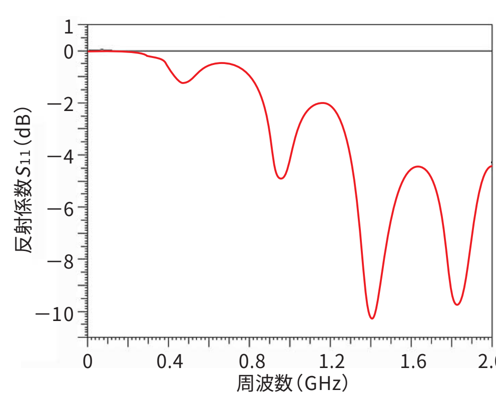


図11　Micro-StripesでシミュレーションしたS_{11}の結果
いくつかの周波数で反射が少なくなっている．

同軸ケーブルの先端に露出した内導体線路は，あたかも1/4波長のモノポール・アンテナの素子のように考えられます．**図14**はこのときの電流分布を示しています．同軸ケーブルの外導体が切れる場所を励振源にしたアンテナの様相を呈しています．

図15は先に述べた阻止管を応用した例とも考えられます．等価回路的には図のように並列LC共振回路によるトラップ[注5]を挿入した効果が得られます．トラップより先の1/2波長と，トラップ以降の1/2波長の電流の向きは同じですから，合成された放射は強まります．また，この動作を積極的に利用したのが**図16**に示すアンテナ(multiple-skirt coaxial antenna)です(4)．

以上述べたように，本来はシールドを目的とする同軸ケーブルですが，動作条件によっては外導体から積極的な放射が起こることがわかりました．

2．磁気シールドの方法

● シールドの効果を表す物理量

シールドの効果を数値で表すために用いられる値に，シールド効果(SE：shielding effectiveness，またはshielding efficiency)があります．この値はある観測点でシールドを施す前の電磁界を(E_0，H_0)としたとき，シールドを施して入射波の進路を遮ったときの電磁界を(E，H)とし，次の式で定義されます(1)．

注5：トラップとは，LとCを並列接続した反共振回路．

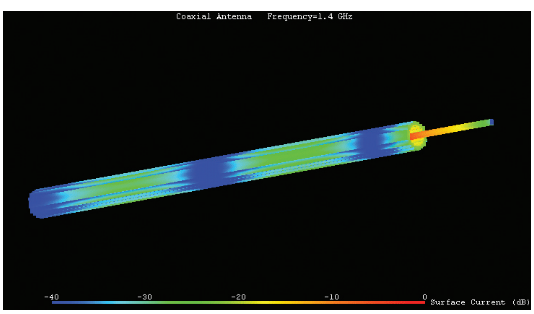


図12 同軸ケーブルの表面電流(1.4GHz)
外導体の外側の表面に周期的な電流の強弱が認められる．

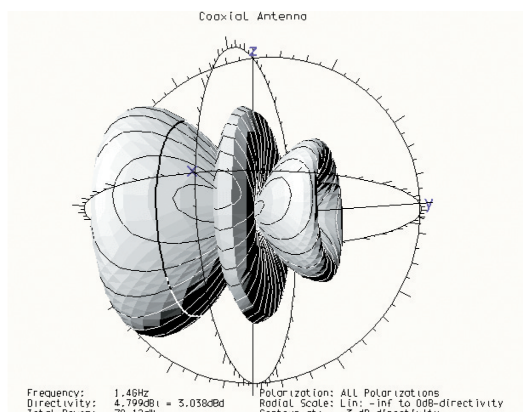


図13 同軸ケーブルの遠方界放射パターン
同軸ケーブルの外導体からの放射を含んだパターンになっている．

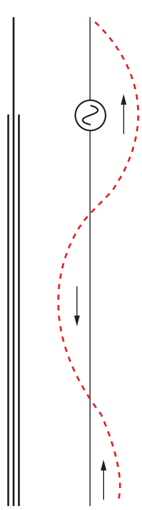


図14 同軸ケーブルの電流のようす
点線は電流の強度を示す．

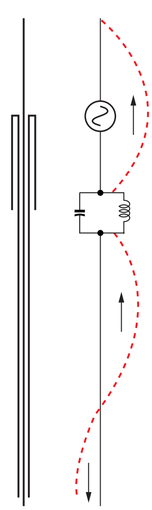


図15 阻止管を応用した同軸アンテナ
並列LC共振回路によるトラップを挿入した効果が得られる．

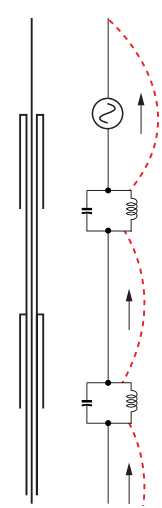


図16 複数個の阻止管を使った同軸アンテナ(multiple-skirt coaxial antenna)

$$SE_E = -20\log_{10}\frac{|\boldsymbol{E}|}{|\boldsymbol{E}_0|} \quad \cdots\cdots(5)$$

$$SE_H = -20\log_{10}\frac{|\boldsymbol{H}|}{|\boldsymbol{H}_0|} \quad \cdots\cdots(6)$$

$$SE_P = -10\log_{10}\frac{|\boldsymbol{P}|}{|\boldsymbol{P}_0|} \quad \cdots\cdots(7)$$

ここで$\boldsymbol{P}$と$\boldsymbol{P}_0$は，シールドを施す前と施した後における空間内の特定の面を通過する電力

● 磁気シールドの効果

静磁界や周波数が低い場合，磁気をシールドするには磁性体や超電導体の覆いが必要になります．例えば，半径R，厚さtで比透磁率μ_rの球殻による一様磁界のシールド効果は，近似的に次の式で表されます．

$$SE_H \approx 20\log_{10}\left(1+\frac{2\mu_r t}{3R}\right)\text{[dB]} \quad \cdots\cdots(8)$$

図17に磁性体シールドのようすを示します．高透磁率磁性材の比透磁率はたかだか10^6程度で，**図17**のような1層では高いシールド効果は期待できず，多層構造のシールドを用いる場合があります[(1)]．

静磁界のシールドでは，強磁性体の残留磁化の影響を除くために，シールド層に交流電流を流して消磁することもあるようです．

注6：マイスナー効果は，電気伝導度が無限大という考えかた（オームの法則の極限）では説明できない．1935年，ロンドン兄弟はこれを説明する現象論的な理論を提案した．

● 超伝導のマイスナー効果

超伝導体には，外部から加えられた磁界を完全に排除する性質（完全反磁性の性質）があり，マイスナー効果と呼ばれています．**図18**は超伝導シールドのようすを示しています．磁力線はこのように，超伝導体の内部に入り込むことはできません．

一般に超伝導シールドは，強磁界あるいは逆にきわめて弱い磁界を扱う場合の磁気シールドに用いられます．

マイスナー効果を説明する理論がロンドン[注6]によって提唱されました．

$$\left(\frac{m}{ne^2}\right)\text{rot}\,\boldsymbol{J} = -\boldsymbol{B} \quad \cdots\cdots(9)$$

m：電子の質量，n：単位体積中の電子の数，
e：電子の電荷，$\boldsymbol{J}$：電流密度，$\boldsymbol{B}$：磁束密度

式(9)はロンドン方程式と呼ばれています．物理的な意味は「磁界が存在すると，その磁界を取り囲んで，その磁界を打ち消すように，外部磁界の向きと逆向きに回転する電流（超伝導電流）が流れる」というものです．式(9)はマクスウェルの方程式（本誌2004年9月号，pp.120-124の連載第5回を参照）とは独立して存在し，マクスウェルの方程式には抵触しません[(5)]．

● 高周波磁界のシールド効果

非磁性金属は，低周波の磁界に対するシールド効果はほとんどありませんが，周波数が高くなるとシールド効果が現れます．これは金属表面に磁界の変化を弱める向きに発生する誘導電流（渦電流；本誌2005年8月号，pp.91-98の

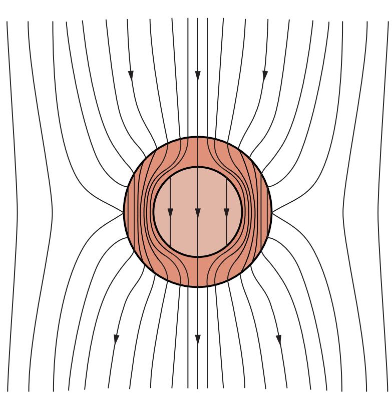


図17　磁性体シールドのようす
1層では高いシールド効果は期待できない．

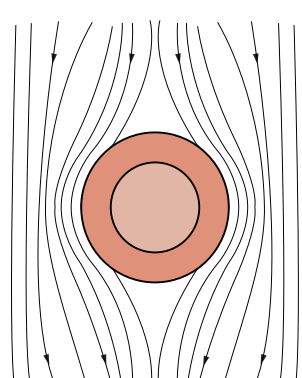


図18　超伝導シールドのようす
磁力線は超伝導体の内部に入り込むことはできない．



写真3　テラビット・ルータの基板モジュール

連載第13回を参照）のためで，ファラデーの電磁誘導の法則によって，時間的に変化する磁界（高周波磁界）が金属筐体表面に電流を発生させます．

金属には抵抗があるので損失を生じ，これを渦電流損といいます．磁気エネルギーの一部は，渦電流によって発生する熱エネルギーとなって失われます．

3．高周波のシールド

● 高周波電磁界の反射・吸収

高周波領域では，シールド筐体の寸法に比べ波長が短くなります．このような場合には，遠方から平板状のシールド面に垂直に入射する平面波を想定したモデルで説明されます．

$$A = 8.686Re(\gamma)\,d \quad [\mathrm{dB}] \cdots\cdots(10)$$

$$R = 20\log_{10}\left|\frac{(1+K)^2}{4K}\right| \quad [\mathrm{dB}] \cdots\cdots(11)$$

$$B = 20\log_{10}\left|1-\frac{(1-K)^2}{(1+K)^2}e^{-2\gamma d}\right| \quad [\mathrm{dB}] \cdots\cdots(12)$$

$K = Z_S/Z_0$，Z_S：シールド材の固有インピーダンス，
Z_0：自由空間の固有インピーダンス，d：シールド材の厚さ
γ：シールド材中の伝搬定数（$\gamma = j\omega\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r}$）

このときシールド効果SEは，式(10)，式(11)，式(12)のdB値をすべて加えたものになり，シェルクノフの式と呼んでいます[1]．ここで式(10)を吸収損，式(11)を反射損，式(12)を多重反射項といいます．

シールドは無限の平板を仮定しており，波面も平面であるため，複雑な形状をした実際のシールド筐体問題にはそのまま適用できません．Micro-Stripesなどの任意形状の3次元CADを有する電磁界シミュレータは，次項で述べるように，問題となる回路基板やシールド筐体をできる限り忠実にモデリングすることで，空間の観測点における電界や磁界の値から，容易にSE値が得られます．

● 筐体の形状とシールド効果

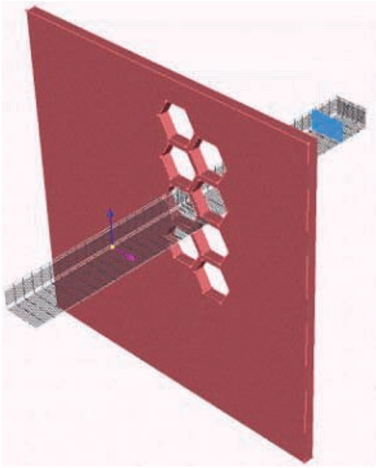
放射物を完全に密閉すれば，高いシールド効果が得られますが，少なくとも電気の入出力ケーブル用の孔は必要です．また放熱の必要性から筐体には開口部を設けることになり，これらによってシールド効果は変動します．

写真3はテラビット・ルータの基板モジュールです．複数個並べてラックにマウントされます．左右の側面にある厚手の金属板には，放熱のために6角形状の孔（air vent）が数多く開いています．

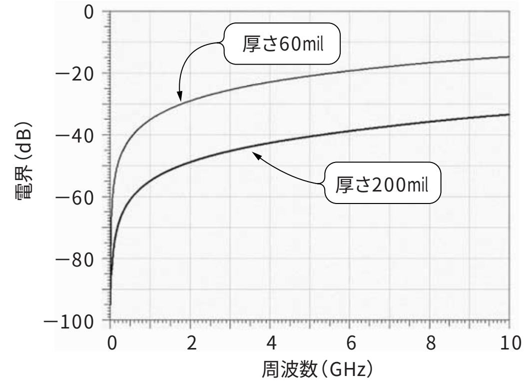
基板モジュール内で発生した電磁ノイズは，これらの孔を介して空間へ放射され，深刻なケースでは出荷基準を満たさなくなることもあります．

放熱のために孔をふさぐことはできませんが，一方で不要放射は減らさなければなりません．基板モジュール内から外へ電磁波が漏れているということは，逆に外の空間にある電磁波も侵入しやすくなっているということです．このようにシールド問題は，送信アンテナと受信アンテナの関係と同様，可逆性があることに注意する必要があるでしょう．

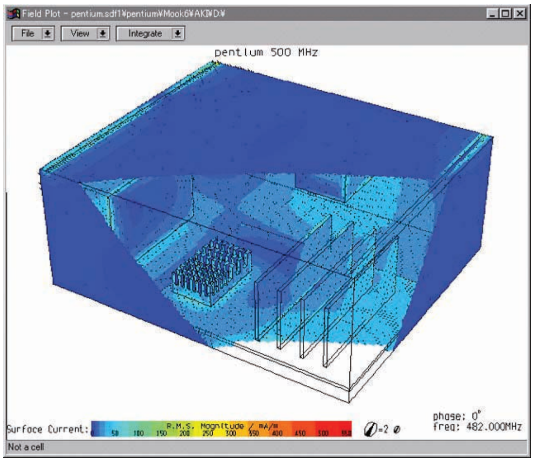
図19は6角形の孔の右側で電磁界を発生させ，シールド板の左側の空間で電磁界を観測するモデルです．**図20**に，孔の左側の電界を示します．観測された電界は，周波数が



◀ **図19**
6角形状の孔モデル（Micro-Stripes）
6角形の孔の右側で電磁界を発生させ，シールド板の左側の空間で電磁界を観測するモデル．

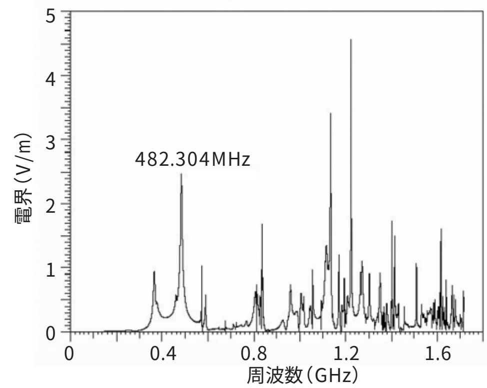


▶ **図20**
孔の左側の電界
孔の厚さによって空間の電界強度が大きく変化する．



◀ **図21 デスクトップ・パソコンの導体表面電流の強さ**

メイン・ボード，電源ユニット，装着された4枚のボードなどで構成されている．



▶ **図22 ケース上ぶたの接合部付近における空間の電界**

複数の特定周波数で強い電界を示す．

高くなるにつれて増加しているのがわかります．ここでおもしろいのは，孔の厚さによって空間の電界強度が大きく変化している点です．厚さ60mil（約1.5mm）の孔を，厚さ200mil（約5.1mm）の孔に換えるだけで，約20dBの効果が得られています[6]．

また，**図21**はデスクトップ・パソコンのモデルです．メイン・ボード，電源ユニット，装着された4枚のボードなどで構成されています．ノイズ源はプロセッサの放熱フィンを想定し，シールド・ケース内の空間と，外部の空間に観測点を設けて，電磁界の強さを比較しました．

図22は，ケース上ぶたの接合部付近の空間に観測点をとってシミュレーションした結果です．複数の特定周波数で強い電界を示しています．このモデルは，問題箇所を特定する目的で，上ぶたの接合部のすき間以外は完全に密閉しています．したがってケース内で発生した電磁波は，このすき間を介して外部へ漏れていることになります．

特定周波数で強い電磁界が観測される原因としては，筐体内部の空胴共振モードや，開口部がスロット・アンテナとして動作することが考えられます．電磁界シミュレーションでは，それぞれの周波数における金属表面の電流分布を調べることで，問題となっている箇所を容易に特定でき，適切な対策を講じることができます[2]．

まとめ

電磁シールドをそのしくみによって電界シールドと磁気シールドに分けて調べました．静電界や静磁界のシールドは，ファラデーの実験器具などでくふうされたように，早い時期に実現されました．一方，高周波のシールドについては，製品のデザインや操作性の観点から，教科書どおりの理想的な機構を採用するわけにはいきません．今後，さらに信号の周波数が高くなると，不用意に開けた基板の小さな溝がスロット・アンテナとして動作するようになるかもしれません．また，複雑な多層構造の線路にも，不要放射の発生源が潜んでいるかもしれません．今回はおもに電磁シールドのしくみについて調べました．配線やケーブルのシールドについては，別の機会に説明することにします．

参考・引用*文献

(1) 仁田周一，上芳夫，佐藤由郎，杉浦 行，瀬戸信二，藤原 修 編集；環境電磁ノイズハンドブック，朝倉書店，1999年（初版第1刷）．
(2) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界， CQ出版社，2003年（第6版）．
(3) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界， CQ出版社，2003年（第2版）．
(4) E-H Antenna，http://www.w8ji.com/e-h_antenna.htm
(5) 五十嵐靖則；超伝導とマイスナー効果の実験，科学フォーラム，pp.56-57，東京理科大学，2005年5月号．
(6) 小暮裕明；EMC問題のケース・スタディ――テラビット・ルータのトラブル・シューティング事例，pp.126-135，Design Wave Magazine，2001年12月号．

こぐれ・ひろあき
小暮技術士事務所・技術士（情報工学部門）
http://www.kcejp.com/